

ОЦЕНКА СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ТРАНСФОРМАТОРАХ ПРИ УСТАНОВКЕ БАТАРЕЙ НИЗКОВОЛЬТНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Канд. техн. наук, доц. РАДКЕВИЧ В. Н., инж. ТАРАСОВА М. Н.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: vlanir43@mail.ru

Рассматривается метод оценки степени снижения потерь активной мощности в силовых трансформаторах напряжением 10(6)/0,4 кВ при установке устройств компенсации реактивной мощности на вторичной стороне в зависимости от уровня напряжения, подведенного к конденсаторным установкам, с учетом диэлектрических потерь в конденсаторах. Произведен анализ рассмотренных функциональных зависимостей. Выполнено исследование функции с помощью производных. Найдены точки экстремума функции, а также ее интервалы возрастания и убывания. Произведено графическое исследование полученной функциональной зависимости, представляющей собой многочлен четвертой степени. Выяснено, что снижение потерь активной мощности зависит от технических параметров и коэффициента загрузки трансформатора, коэффициента мощности нагрузки потребителей электроэнергии, величины напряжения, подведенного к конденсаторной установке.

С использованием полученных функциональных зависимостей выполнены расчеты для основных типоразмеров силовых трансформаторов напряжением 10(6)/0,4 кВ серий ТМГ11 и ТМГ12. Установлено, что в зависимости от технических характеристик каждого конкретного трансформатора, его коэффициентов загрузки и мощности существует определенное значение отклонения фактической величины напряжения от номинального напряжения конденсаторной установки, при котором будет наблюдаться положительный технико-экономический эффект от установки конденсаторных батарей. При принятых значениях коэффициентов загрузки и мощности трансформатора максимальное снижение потерь активной мощности имеет место при напряжении, подведенном к конденсаторной установке, меньшем номинального значения. Для всех рассмотренных типоразмеров силовых трансформаторов аргумент исследуемой функции, при котором наблюдается наибольшее ее значение, находится вне диапазона нормально допустимых отклонений напряжения от номинального значения.

Рассмотренные функциональные зависимости могут использоваться при проведении предварительных расчетов, необходимых для принятия решения по компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения производственных объектов. Их учет позволит более точно оценивать технико-экономический эффект от установки батарей конденсаторов в электрических сетях напряжением до 1 кВ.

Ключевые слова: трансформатор, активная мощность, батарея конденсаторов, конденсаторная установка.

Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.

ESTIMATION OF DECREASING LOSSES OF ACTIVE POWER IN TRANSFORMERS IN SETTING BATTERY OF LOW-VOLTAGE CAPACITORS

RADKEVICH V. N., TARASOVA M. N.

Belorussian National Technical University

This paper describes an estimation method of decreasing losses of active power in power transformers with voltage 10(6)/0,4 kV after installation of devices of reactive power compensation on output side depending on voltage level,

connected to capacity devices, taking into account dielectric loss in capacitors. Analysis of functional dependences was carried out. Investigation of function with a help of derivations was carried out. Points of function extremum and also its intervals of rise and fall rates were founded. This paper describes graphic investigation of obtained functional dependence, which is introduced by quartic polynomial. It is established that decreasing of losses of active power depends on technical parameters and load factor of transformer, coefficient of loading power of electricity consumers, voltage value connected to capacitor unit.

Using obtained functional dependences, calculations for the main size-types of power transformers with voltage 10(6)/0,4 kV serie ТМГ 11 and ТМГ12 were done. It is established that depending on technical characteristics of certain transformer, coefficient of its loading and power, there is a definite value of deviation of real voltage value from working voltage of capacitor installation when it will be observed positive technical and economical effect from installed capacitor battery unit. For taken value of loading coefficient and transformer's power the maximum decrease of losses of active power takes place under voltage directed to capacitor unit, which is lower then nominal value. For all taken size-types of power transformers the argument of investigating function for its maximal value is out of standard permissible of voltage deviations from nominal value.

These functional dependents can be used for preliminary calculations, which are needed for making decision on compensation of reactive power in electric power supply systems of industrial objects. Their consideration allows more accurately evaluate technical and economical effect from installation of capacitor's batteries in electrical networks with voltage up to 1 kV.

Keywords: transformer, active power, capacitor unit (installation), capacitor bank.

Fig. 4. Tab. 1. Ref.: 10 titles.

Введение. В электроустановках переменного тока элементы, обладающие индуктивным сопротивлением, потребляют реактивную мощность (РМ). Передача ее по электрическим сетям связана с увеличением сечений проводников и установленной мощности трансформаторов, дополнительными потерями мощности, электроэнергии и напряжения [1, 2]. В связи с этим актуальным вопросом электроснабжения промышленных объектов является компенсация реактивной мощности в узлах нагрузки, под которой понимается установка местных источников РМ.

На промышленных предприятиях основным средством компенсации РМ являются конденсаторные батареи (КБ) напряжением до 1 кВ [3, 4]. Как правило, применяются комплектные конденсаторные установки (КУ), состоящие из одной или нескольких КБ, присоединенных к электрической сети через коммутационные аппараты [5]. Решение о целесообразности использования КУ в сетях промышленных предприятий принимается при проектировании систем электроснабжения (СЭС) на основе технико-экономических расчетов [3, 6]. В процессе эксплуатации при изменении структуры электроприемников и увеличении реактивной нагрузки предприятия снизить загрузку трансформаторов можно, увеличив их номинальную мощность, а линий электропередачи – повысив сечения токопроводящих жил. Это приводит к уменьшению потерь мощности в элементах СЭС, но связано с существенными капитальными вложениями.

Меньших денежных затрат требует установка дополнительных средств компенсации РМ на напряжении до 1 кВ. Однако в КУ имеют место диэлектрические потери мощности. Удельные потери мощности в низковольтных КУ составляют около 4 кВт/Мвар [6]. Если величина, на которую

снижаются потери активной мощности в трансформаторах и линиях электропередачи СЭС за счет использования КУ меньше или равна потерям в самих батареях, то потребитель не получает эффекта от применения дополнительных средств компенсации РМ. Следовательно, установленные на предприятии КУ, на которые затрачены денежные средства, для потребителя не окупаются. Однако с учетом того, что снижение потерь мощности происходит также и в сетях энергоснабжающей организации, в целом применение КУ приводит к положительному общему результату.

В условиях социалистической системы хозяйствования с народнохозяйственной точки зрения безразлично, кто получает выгоду от снижения потерь электроэнергии в электрических сетях – промышленное предприятие или энергоснабжающая организация, так как и тот, и другой субъект хозяйствования принадлежат государству, которое контролирует ценообразование. Иная ситуация имеет место при рыночных отношениях субъектов хозяйствования с разными формами собственности, когда дополнительные затраты на РМ увеличивают себестоимость продукции предприятия и, следовательно, ее цену. В связи с этим следует производить расчеты по оценке степени снижения потерь мощности в СЭС при установке дополнительных КБ.

Для промышленных объектов практический интерес представляет величина снижения потерь мощности и электроэнергии в элементах СЭС от точки установки батарей конденсаторов до границы раздела электрических сетей предприятия и энергоснабжающей организации.

Основная часть. В данной работе исследовано, как влияет компенсация РМ в сети до 1 кВ на общие потери активной мощности в силовом трансформаторе и КУ. Для этого рассмотрим схему сети, приведенную на рис. 1. Силовой трансформатор Т напряжением 10(6)/0,4 кВ с номинальной мощностью $S_{ном}$ питает потребителя электроэнергией, имеющего реактивную нагрузку $Q_{рн}$. При отсутствии КУ из сети напряжением 10(6) кВ через трансформатор Т в сеть до 1 кВ передается реактивная мощность $Q = Q_{рн}$ (рис. 1а). Если к шинам вторичного напряжения трансформаторной подстанции подключить конденсаторную установку СВ, генерирующую реактивную мощность Q_k , то потребляемая из сети 10(6) кВ РМ уменьшится и составит $Q' = Q_{рн} - Q_k$ (рис. 1б). При этом снизится загрузка силового трансформатора по РМ.

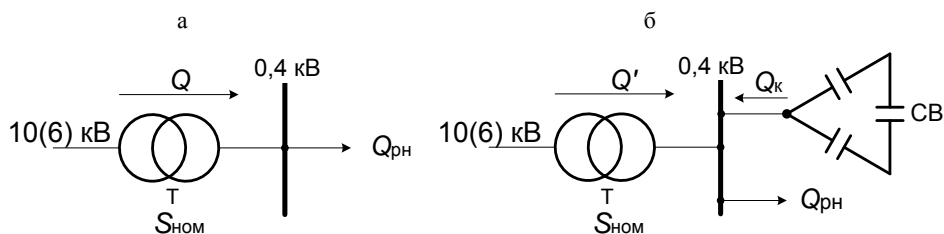


Рис. 1. Схема электрической сети: а – без компенсирующего устройства; б – с конденсаторной установкой на напряжении до 1 кВ

Известно [7], что установка компенсирующих устройств способна снизить потери активной мощности (кВт) в элементах СЭС на величину

$$\delta P = (2QQ_k - Q_k^2) \frac{R}{U_{\text{ном}}^2} 10^{-3}, \quad (1)$$

где Q – реактивная мощность, передаваемая по элементу до КУ, квар; Q_k – мощность КУ, квар; R – активное сопротивление элемента, Ом; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение сети, кВ.

При компенсации РМ в сети напряжением до 1 кВ в силовом трансформаторе будут изменяться только нагрузочные потери мощности. Поэтому выражение (1) применимо для оценки степени снижения потерь активной мощности в трансформаторах напряжением 10(6)/0,4 кВ. Активное сопротивление силового трансформатора определяется по выражению [8]

$$R_T = \frac{\Delta P_k U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}^2} 10^3, \quad (2)$$

где ΔP_k – потери короткого замыкания трансформатора, кВт; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение обмотки трансформатора, присоединенной к сети, для которой ведется расчет, кВ; $S_{\text{ном}}$ – номинальная мощность трансформатора, кВ·А.

Подставив выражение (2) в (1) и выполнив преобразования, получим формулу для расчета величины снижения нагрузочных потерь активной мощности в трансформаторе при установке компенсирующего устройства в сети напряжением до 1 кВ

$$\delta P_T \frac{\Delta P_k}{S_{\text{ном}}^2} (2QQ_k - Q_k^2). \quad (3)$$

С учетом потерь активной мощности в КУ

$$\delta P_T = \frac{\Delta P_k}{S_{\text{ном}}^2} (2QQ_k - Q_k^2) - k_{\text{КУ}} Q_k, \quad (4)$$

где $k_{\text{КУ}}$ – удельные потери активной мощности в КУ, кВт/квар.

Реактивная мощность, передаваемая через трансформатор из сети первичного напряжения в сеть вторичного напряжения, может быть представлена

$$Q = \beta_T S_{\text{ном}} \sin \varphi_1, \quad (5)$$

где β_T – коэффициент загрузки трансформатора; φ_1 – разность фаз напряжения и тока, соответствующая коэффициенту мощности нагрузки трансформатора без применения средств компенсации РМ.

Номинальная мощность КБ $Q_{\text{к.ном}}$ генерируется только при условии, что в точке подключения ее к электрической сети напряжение U равно номинальному напряжению КУ $U_{\text{ном}}$. При фактических значениях напряжения U , отличающихся от $U_{\text{ном}}$, мощность КУ составит [4]

$$Q_k = Q_{\text{к.ном}} \frac{U^2}{U_{\text{ном}}^2}. \quad (6)$$

Запишем выражение (4) с учетом (5) и (6):

$$\delta P_T = \frac{\Delta P_K}{S_{\text{НОМ}}^2} \left(2\beta_T S_{\text{НОМ}} \sin \varphi_1 Q_{\text{К.НОМ}} \frac{U^2}{U_{\text{НОМ}}^2} - Q_{\text{К.НОМ}}^2 \frac{U^4}{U_{\text{НОМ}}^4} \right) - k_{\text{КУ}} Q_{\text{К.НОМ}} \frac{U^2}{U_{\text{НОМ}}^2}. \quad (7)$$

Действительное напряжение, подведенное к КУ, можно представить как

$$U = \alpha U_{\text{НОМ}}, \quad (8)$$

где α – коэффициент, показывающий, во сколько раз фактическое значение напряжения отличается от $U_{\text{НОМ}}$.

Коэффициент α является нормируемым параметром качества электроэнергии, который в нормальном режиме имеет значения от 0,95 до 1,05 [9].

Так как $\alpha = \frac{U}{U_{\text{НОМ}}}$, формулу (7) можно записать в следующем виде:

$$\delta P_T = \frac{\Delta P_K}{S_{\text{НОМ}}^2} 2\beta_T S_{\text{НОМ}} \sin \varphi_1 Q_{\text{К.НОМ}} \alpha^2 - Q_{\text{К.НОМ}}^2 \alpha^4 - k_{\text{КУ}} Q_{\text{К.НОМ}} \alpha^2. \quad (9)$$

Выполним преобразование многочлена (9), сгруппировав его в порядке убывания степеней аргумента полученной функции:

$$\delta P_T = -Q_{\text{К.НОМ}}^2 \frac{\Delta P_K}{S_{\text{НОМ}}^2} \alpha^4 + Q_{\text{К.НОМ}} \left(2\beta_T S_{\text{НОМ}} \sin \varphi_1 \frac{\Delta P_K}{S_{\text{НОМ}}^2} - k_{\text{КУ}} \right) \alpha^2. \quad (10)$$

Для упрощения дальнейшего изложения введем вспомогательную переменную A

$$A = 2\beta_T S_{\text{НОМ}} \sin \varphi_1 \frac{\Delta P_K}{S_{\text{НОМ}}^2}. \quad (11)$$

Тогда формулу (10) можно представить в следующем виде:

$$\delta P_T = -Q_{\text{К.НОМ}}^2 \frac{\Delta P_K}{S_{\text{НОМ}}^2} \alpha^4 + Q_{\text{К.НОМ}} A - k_{\text{КУ}} \alpha^2. \quad (12)$$

Выполним исследование функции (12) с помощью производных [10]. Найдем точки экстремума функции, а также ее интервалы возрастания и убывания, продифференцировав δP_T по основанию α :

$$\delta P_T' = -4Q_{\text{К.НОМ}}^2 \frac{\Delta P_K}{S_{\text{НОМ}}^2} \alpha^3 + 2Q_{\text{К.НОМ}} A - k_{\text{КУ}} \alpha^2. \quad (13)$$

Соотношение (11) запишем в виде

$$\frac{A}{2\beta_T S_{\text{НОМ}} \sin \varphi_1} = \frac{\Delta P_K}{S_{\text{НОМ}}^2}. \quad (14)$$

С учетом (14) представим выражение (13) как

$$\delta P'_T = -4Q_{к.ном}^2 \frac{A}{2\beta_T S_{ном} \sin \varphi_1} \alpha^3 + 2Q_{к.ном} \frac{A - k_{КУ}}{A} \alpha. \quad (15)$$

Разобьем правую часть выражения (15) на множители

$$\delta P'_T = -4Q_{к.ном}^2 \frac{A}{2\beta_T S_{ном} \sin \varphi_1} \alpha \left(\alpha^2 - \frac{A - k_{КУ} \beta_T S_{ном} \sin \varphi_1}{Q_{к.ном} A} \right). \quad (16)$$

В формуле (16) выражение в скобках представляет собой разность квадратов α и $\sqrt{\frac{A - k_{КУ} \beta_T S_{ном} \sin \varphi_1}{Q_{к.ном} A}}$. Выполним преобразования, получим

$$\begin{aligned} \delta P'_T = -4Q_{к.ном}^2 \frac{A}{2\beta_T S_{ном} \sin \varphi_1} \alpha \left(\alpha - \sqrt{\frac{A - k_{КУ} \beta_T S_{ном} \sin \varphi_1}{Q_{к.ном} A}} \right) \times \\ \times \left(\alpha + \sqrt{\frac{A - k_{КУ} \beta_T S_{ном} \sin \varphi_1}{Q_{к.ном} A}} \right). \end{aligned} \quad (17)$$

Производная является многочленом, численное значение которого равно нулю при $\alpha_0 = 0$; $\alpha_1 = \sqrt{\frac{A - k_{КУ} \beta_T S_{ном} \sin \varphi_1}{Q_{к.ном} A}}$; $\alpha_2 = \sqrt{\frac{A - k_{КУ} \beta_T S_{ном} \sin \varphi_1}{Q_{к.ном} A}}$.

Расчетную величину номинальной мощности КУ можно найти по формуле

$$Q_{к.ном} = P \operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2, \quad (18)$$

где P – активная мощность нагрузки трансформатора, кВт; $\operatorname{tg} \varphi_1$, $\operatorname{tg} \varphi_2$ – соответственно коэффициент реактивной мощности до и после установки КУ.

Активную нагрузку трансформатора выразим как

$$P = \beta_T S_{ном} \cos \varphi_1, \quad (19)$$

где $\cos \varphi_1$ – коэффициент мощности нагрузки трансформатора до установки компенсирующего устройства.

Тогда расчетное значение номинальной мощности КУ

$$Q_{к.ном} = \beta_T S_{ном} \cos \varphi_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2. \quad (20)$$

С учетом (20) получим следующие значения коэффициента α :

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{A - k_{КУ} \beta_T S_{ном} \sin \varphi_1}{\beta_T S_{ном} \cos \varphi_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2} A} = \sqrt{\frac{A - k_{КУ} \operatorname{tg} \varphi_1}{\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2} A}; \quad (21)$$

$$\alpha_2 = -\sqrt{\frac{A - k_{\text{КУ}} \beta_{\text{T}} S_{\text{НОМ}} \sin \varphi_1}{\beta_{\text{T}} S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2 A}} = -\sqrt{\frac{A - k_{\text{КУ}} \operatorname{tg} \varphi_1}{\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2 A}}. \quad (22)$$

Функция (12) имеет экстремумы при $\alpha = 0$, а также при значениях α_1 и α_2 . Эти точки разбивают всю область определения данной функции на четыре интервала. Знаки производной слева и справа от критических точек отмечены на рис. 2.

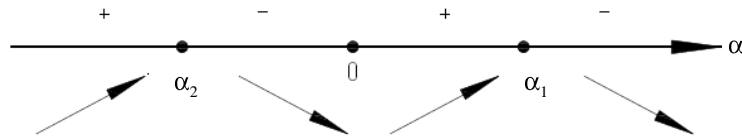


Рис. 2. К исследованию знака производной

Очевидно, что точка $\alpha = 0$ является точкой минимума функции, а точки α_1, α_2 соответствуют максимумам функции (12).

Выполним графическое исследование функциональной зависимости (12). Функция (12) – многочлен четвертой степени, графически представленный на рис. 3. Вершины графика находятся в точках максимума функции α_1, α_2 . Очевидно, что наибольшее значение исследуемая величина, определяющая степень снижения потерь активной мощности в силовом трансформаторе с учетом потерь в КУ, будет иметь в точках максимума описывающей ее функции. Вместе с тем отметим, что при анализе графического представления функции (12) следует принимать во внимание два фактора, ограничивающих область значения аргумента функции α :

1) в соответствии с физическим смыслом параметра α область его определения включает в себя лишь не отрицательные числа ($\alpha \geq 0$);

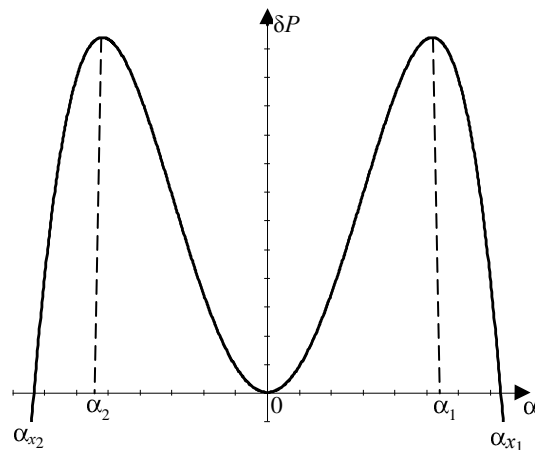


Рис. 3. Графическое представление функции (12)

2) требования, предъявляемые к параметрам качества электрической энергии, в частности в отношении предельно допустимых отклонений

напряжения от номинального значения в нормальном режиме, ограничивают значения α в диапазоне 0,95–1,05 [9].

Построение графика функции (12) с учетом всех налагаемых на аргумент функции ограничений позволяет наглядно проиллюстрировать ответ на вопрос: возрастает или убывает величина снижения потерь активной мощности в силовом трансформаторе при компенсации РМ с учетом потерь в КУ при изменениях напряжения сети в нормируемых границах: $(0,95-1,05)U_{\text{ном}}$.

Для того чтобы проанализировать взаиморасположение точек максимума (α_1 и α_2) функции (12), точек ее пересечения с осью абсцисс (α_{x1} и α_{x2}), а также асимптот нормируемых границ отклонения напряжения, найдем точки пересечения исследуемой функции с осью абсцисс, представив (12) с учетом соотношения (14):

$$\delta P_T = -Q_{\text{к.ном}}^2 \frac{A}{2\beta_T S_{\text{ном}} \sin \varphi_1} \alpha^4 + Q_{\text{к.ном}} (A - k_{\text{КУ}}) \alpha^2. \quad (23)$$

После преобразований (23) запишем в виде

$$\delta P_T = -Q_{\text{к.ном}}^2 \frac{A}{2\beta_T S_{\text{ном}} \sin \varphi_1} \alpha^2 \left(\alpha^2 - \frac{2(A - k_{\text{КУ}}) \beta_T S_{\text{ном}} \sin \varphi_1}{AQ_{\text{к.ном}}} \right). \quad (24)$$

В (24) выражение в скобках – это разность квадратов α и $\sqrt{\frac{2(A - k_{\text{КУ}}) \beta_T S_{\text{ном}} \sin \varphi_1}{AQ_{\text{к.ном}}}}$. Выполнив преобразования, получим

$$\delta P_T = -Q_{\text{к.ном}}^2 \frac{A}{2\beta_T S_{\text{ном}} \sin \varphi_1} \alpha^2 \left(\alpha - \sqrt{\frac{2(A - k_{\text{КУ}}) \beta_T S_{\text{ном}} \sin \varphi_1}{AQ_{\text{к.ном}}}} \right) \times \left(\alpha + \sqrt{\frac{2(A - k_{\text{КУ}}) \beta_T S_{\text{ном}} \sin \varphi_1}{AQ_{\text{к.ном}}}} \right). \quad (25)$$

Следовательно, рассматриваемая функция имеет корни в характерных точках:

$$\alpha_{x0} = 0; \quad \alpha_{x1} = \sqrt{\frac{2(A - k_{\text{КУ}}) \beta_T S_{\text{ном}} \sin \varphi_1}{AQ_{\text{к.ном}}}}; \quad \alpha_{x2} = -\sqrt{\frac{2(A - k_{\text{КУ}}) \beta_T S_{\text{ном}} \sin \varphi_1}{AQ_{\text{к.ном}}}}. \quad (26)$$

Запишем корни α_{x1} и α_{x2} и выражения (26) с учетом (20):

$$\alpha_{x1} = \sqrt{\frac{2(A - k_{\text{КУ}}) \beta_T S_{\text{ном}} \sin \varphi_1}{\beta_T S_{\text{ном}} \cos \varphi_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2 A}} = \sqrt{\frac{2(A - k_{\text{КУ}}) \operatorname{tg} \varphi_1}{\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2 A}}; \quad (27)$$

$$\alpha_{x2} = -\sqrt{\frac{2 A - k_{KY} \beta_T S_{НОМ} \sin \varphi_1}{\beta_T S_{НОМ} \cos \varphi_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2 A}} = -\sqrt{\frac{2 A - k_{KY} \operatorname{tg} \varphi_1}{\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2 A}}. \quad (28)$$

Отметим, что ненулевые корни уравнения (25) (точки пересечения кривой с осью абсцисс) в $\sqrt{2}$ раз больше координат вершин параболы по оси абсцисс (формулы (21), (22)).

Для иллюстрации произведем расчет значений A по формуле (11), α_1 и α_2 – по (21) и (22), α_{x1} и α_{x2} – по (27) и (28) для основных типоразмеров трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ типов ТМГ11 и ТМГ12, применяемых в системах распределения электроэнергии промышленных предприятий. При расчете принимали каталожные данные силовых трансформаторов и значения $\beta_T = 0,7$; $\cos \varphi_1 = 0,7$; $\cos \varphi_2 = 0,97$; $k_{KY} = 0,004$ кВт/квар. Полученные результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные значения коэффициентов A , α и α_x для трансформаторов типов ТМГ11 и ТМГ12

Тип трансформатора	$S_{НОМ}$, кВ·А	ΔP_k , кВт	A	α_1	α_2	α_{x1}	α_{x2}
ТМГ11-630/10	630	7,45	0,0118	0,93657	-0,93657	1,32451	-1,32451
ТМГ11-1000/10	1000	10,80	0,0108	0,91355	-0,91355	1,29196	-1,29196
ТМГ11-1250/10	1250	13,50	0,0108	0,91355	-0,91355	1,29196	-1,29196
ТМГ11-1600/10	1600	16,50	0,0103	0,90076	-0,90076	1,27386	-1,27386
ТМГ12-630/10	630	6,75	0,0107	0,91140	-0,91140	1,28891	-1,28891
ТМГ12-1000/10	1000	10,50	0,0105	0,90584	-0,90584	1,28105	-1,28105
ТМГ12-1250/10	1250	13,25	0,0106	0,90847	-0,90847	1,28477	-1,28477

По результатам расчетов для трансформаторов типов ТМГ11 и ТМГ12 построим семейство кривых функции (23), приняв значения коэффициентов при аргументах функции по табл. 1 (рис. 4).

На графике функции отобразим границы допустимой области определения параметра α в соответствии с указанными выше ограничениями, накладываемыми на этот параметр. На рис. 4 отметим также координаты вершин, найденные по данным, приведенным в табл. 1.

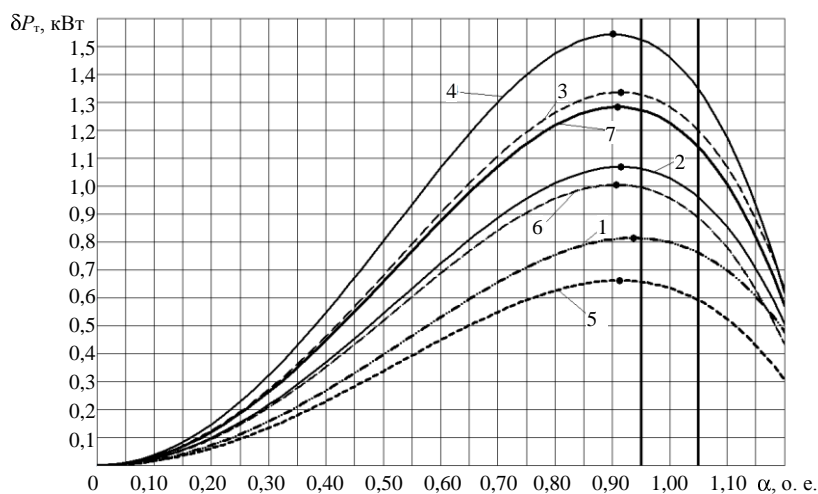


Рис. 4. Семейство кривых $\delta P_T(\alpha)$: 1 – ТМГ11-630/10; 2 – ТМГ11-1000/10;
3 – ТМГ11-1250/10; 4 – ТМГ11-1600/10; 5 – ТМГ12-630/10; 6 – ТМГ12-1000/10;
7 – ТМГ12-1250/10

Как видно из рис. 4, максимумы функции (23) для рассмотренных типоразмеров силовых трансформаторов при заданных параметрах нагрузки и степени компенсации РМ находятся за пределами нормально допустимых значений отклонения напряжения ($\pm 5\%$) на выводах электроприемников в нормальном режиме. Максимумы имеют место при напряжении, подведенном к КУ, несколько меньшем допустимого минимального значения. Это можно объяснить возрастанием диэлектрических потерь мощности в конденсаторах при повышении напряжения. Данное обстоятельство целесообразно учитывать при оценке степени снижения потерь активной мощности в силовых трансформаторах с учетом потерь в КУ, что позволит более точно определять технико-экономический эффект от установки батарей конденсаторов в электрических сетях напряжением до 1 кВ.

ВЫВОДЫ

1. Исследован метод оценки степени снижения потерь активной мощности в силовых трансформаторах при компенсации реактивной мощности на вторичной стороне в зависимости от уровня напряжения, подведенного к конденсаторным установкам, с учетом диэлектрических потерь в конденсаторах. Произведен анализ рассмотренных функциональных зависимостей, которые могут использоваться при принятии решений по компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения производственных объектов.

2. С использованием полученных функциональных зависимостей выполнены расчеты для основных типоразмеров силовых герметичных трансформаторов напряжением 10(6)/0,4 кВ. Установлено, что при принятых исходных данных максимальное снижение общих потерь активной мощности имеет место при напряжении, подведенном к конденсаторной установке, меньшем предельно допустимого минимального значения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы теории цепей: учеб. для вузов / Г. В. Зевеке [и др.]. – М.: Энергия, 1975. – 752 с.
2. Железко, Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Ю. С. Железко. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
3. Инструкция по проектированию электроснабжения промышленных предприятий: СН 174–75. – М.: Стройиздат, 1976. – 56 с.
4. Федоров, А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А. А. Федоров, В. В. Каменева. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 472 с.
5. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 640 с.
6. Инструктивные и информационные материалы по проектированию электроустановок – М.: ВНИПИ «Тяжпромэлектропроект», 1993. – Вып. 2. – 80 с.
7. Мукошеев, Ю. Л. Электроснабжение промышленных предприятий / Ю. Л. Мукошеев. – М.: Энергия, 1973. – 584 с.
8. Мельников, Н. А. Электрические сети и системы / Н. А. Мельников. – М.: Энергия, 1971. – 284 с.
9. ГОСТ 13109–97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения обще-

го назначения. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. – 31 с.

10. Г у с а к, А. А. Справочник по высшей математике / А. А. Гусак, Г. М. Гусак, Е. А. Бричикова. – М.: Тетрасистем, 2006. – 545 с.

REFERENCES

1. Z e v e k e, G. V., Ionkin, P. A., Netushil, A. V., & Strakhov, S. V. (1975) *Fundamentals of Circuit Theory*. Moscow, Energija. 752 p. (in Russian).
2. Z h e l e z k o, Yu. S. (1985) *Compensation of Reactive Power and Increasing of Electric Power Quality*. Moscow, Energoatomizdat. 224 p. (in Russian).
3. SN (Structural Norms) 174–75. Instruction in Design of Electric Power Supply System of Industrial Plants. Moscow, Strojizdat, 1976. 56 p. (in Russian).
4. F e d o r o v, A. A., & Kameneva, V. V. (1984) *Fundamentals of Electric Power Supply of Industrial Plants*. Moscow, Energoatomizdat. 472 p. (in Russian).
5. R e g u l a t i o n s of Electric Power Systems. 6th ed. Moscow, Energoatomizdat, 1985. 640 p. (in Russian).
6. I n s t r u c t i o n a l and Informational Materials in Electrical Plant Design. Moscow, Russian National Scientific-Research and Design Institute “Tyazhpromelektroproekt”, 1993, 2. 80 p. (in Russian).
7. M u k o s e e v, Yu. L. (1973) *Electric Power Supply of Industrial Plants*. Moscow, Energiya. 584 p. (in Russian).
8. M e l n i k o v, N. A. (1971) *Electric Power Networks and Systems*. Moscow, Energiya. 284 p. (in Russian).
9. S t a t e Standard 13109–97. Norms of Electricity Quality in Electric Power Supply Systems of General Purposes (Domestic Purposes). Minsk: Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, 1999. 31 p. (in Russian).
10. G u s a k, A. A., Gusak, G. M., & Brichikova, E. A. (2006) *Ref. Book in Higher Mathematics*. Moscow, Tetrasistem. 545 p. (in Russian).

Представлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 14.07.2014

УДК 621.3.01

ОДИН ТИПИЧНЫЙ ЭКСТРЕМУМ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ

Канд. физ.-мат. наук, доц. ГОРОШКО В. И., ЖУКОВСКАЯ Т. Е.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: jte@tut.by

Целью данной статьи является привлечение внимания преподавателей, научных работников, инженеров и студентов к особенности поиска экстремума в различных электротехнических задачах. Эта особенность состоит в том, что во многих разделах электротехники поиск экстремума сводится к анализу одной и той же математической структуры (Т-структуры), а различия заключаются только в разных обозначениях. В одних задачах эта структура появляется в конечном, наиболее простом виде, в других – Т-структура «завуалирована» и для ее раскрытия нужны, как правило, элементарные алгебраические преобразования.

Учитывая высокую частотность появления упоминаемой структуры в электротехнических задачах, в первом разделе статьи авторы привели по-